中国生态农业学报 2016 年 2 月 第 24 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 218−225

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151111

外加氮源在 Cd 超标菜地上的应用效果*

王艳红 唐明灯 李盟军 艾绍英** 姚建武 罗英健 余丹妮

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室 广州 510640)

摘 要 探讨外加氮源对 Cd 超标菜地不同叶菜吸收 Cd 及土壤 Cd 有效性的影响, 以明确施氮对土壤 Cd 的影响效应, 并试图对不同氮源的应用效果进行综合评价, 为合理利用氮肥来降低叶菜 Cd 含量提供参考。在 Cd 含量为 0.628 $mg\cdot kg^{-1}$ 的 Cd 超标菜地上, 试验研究了氮用量水平为 150 $kg\cdot hm^{-2}$ 时, 4 种氮肥(尿素、硝酸钙、硝酸铵、碳酸氢铵)对矮脚葵扇黑叶白菜(*Brassica chinensis* L.)和白梗尖叶苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.)Cd 含量、品质及土壤 Cd 有效性的效应。结果表明, 田间条件下, 与不施氮处理相比, 4 种氮肥均不同程度地增加了 Cd 超标菜地上 2 种叶菜产量, 降低了其地上部和根系 Cd 含量。4 种氮肥中, 尿素对白梗尖叶苋菜的增产效果最好, 增产幅度达 47.5%; 碳酸氢铵对葵扇黑叶白菜的增产效果最好, 增幅达 59.7%; 硝酸钙降低 2 种叶菜地上部和根系 Cd 含量的效果均优于其他氮肥, 该处理的白梗尖叶苋菜地上部和根系 Cd 含量分别比对照降低 41.6%和 24.1%, 葵扇黑叶白菜降低 32.2%和 25.9%。4 种氮源对 2 种叶菜地上部 Cd 吸收总量、NO_3^--N、NO_2^--N、维生素 C 及可溶性糖含量等的影响各异, 对土壤 pH 和 DTPA-Cd 含量影响也不同。其中, 硝酸铵处理的土壤 pH 分别比对照降低 0.12 和 0.25 个单位, 而土壤 DTPA-Cd 含量则显著增加 15.3%和 14.6%; 碳酸氢铵处理则呈相反变化趋势。综合评价结果显示, 4 种氮肥的综合加权平均值均高于对照处理, 以硝酸钙相对最高, 表明硝酸钙在 Cd 超标菜地上的综合应用效果相对最好。因此, 在 Cd 超标土壤上, 硝酸钙可作为优选氮源使用。
关键词 氮源 菜地 Cd 超标土壤 叶菜 土壤 Cd 有效性
中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0218-08

Effects of nitrogen addition on above-standard Cd-contaminated soils in vegetable fields*

WANG Yanhong, TANG Mingdeng, LI Mengjun, AI Shaoying**, YAO Jianwu, LUO Yingjian, YU Danni

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in Southern Region, Ministry of Agriculture / Guangdong Key Laboratory of Nutrient Recycle and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract The aim of this study was to explore the effects of nitrogen application on Cd uptake by different kinds of leafy vegetables and on soil available cadmium (Cd) content in above-standard Cd-contaminated soils in vegetable fields. The study also comprehensively evaluated the effects of different nitrogen sources application with the aim of developing strategies to reduce Cd concentration in leafy vegetables by managing the application of nitrogen fertilizers. The experiment was carried out in an above-standard Cd-contaminated vegetable soil to investigate the effects of urea [$CO(NH_2)_2$], calcium nitrate [$Ca(NO_3)_2$], ammonium nitrate (NH_4NO_3) and ammonium bicarbonate (NH_4HCO_3) on yield, quality, Cd content, nitrogen content of two kinds of leafy vegetables — *Brassica chinensis* L. (BC) and *Amaranthus mangostanus* L. (AM). Soil DTPA-Cd

* 广东省科技计划项目(2012A030700010)和广州市科技计划项目(2014Y2−00521)资助
** 通讯作者: 艾绍英, 主要研究方向为农业环境与植物营养。E-mail: shaoyingai@21cn.com
王艳红, 主要研究方向为农田重金属污染修复。E-mail: yanhongw@126.com
收稿日期: 2015−10−15 接受日期: 2015−11−25

* Supported by the Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (No. 2012A030700010) and the Guangzhou Municipal Science and Technology Program (No. 2014Y2-00521)
** Corresponding author, E-mail: shaoyingai@21cn.com
Received Oct. 15, 2015; accepted Nov. 25, 2015

content and pH as well as comprehensive effects of nitrogen addition on two vegetables were also investigated. The results showed that all nitrogen sources increased yields and decreased Cd contents in both shoot and root systems of the two leafy vegetables. Furthermore, the highest increase of BC yield (59.7%) was caused by NH_4HCO_3 treatment, while the largest increase of AM yield (47.5%) was caused by $CO(NH_2)_2$ treatment, respectively, compared with control. However, the lowest Cd contents in two kinds of leafy vegetables were observed under $Ca(NO_3)_2$ treatment among all nitrogen treatments. $Ca(NO_3)_2$ decreased Cd content by 41.6% and 24.2%, respectively, in AM shoot and root, by 32.2% and 25.9%, respectively, in BC shoot and root. Moreover, the total content of Cd, nitrate, nitrite, Vitamin C and soluble sugar in the shoot system of the two kinds of leafy vegetables varied with the application of different nitrogen resources. Also similar variances were noted for the changes in soil pH and DTPA-Cd content. NH_4NO_3 application decreased soil pH by 0.12 and 0.25 and increased soil DTPA-Cd content by 15.3% and 14.6%, respectively, in AM and BC. However, the reverse trend was noted under NH_4HCO_3 treatment. Comprehensive evaluation results showed that the four kinds of nitrogen resources had much higher synthetic weighted value than that of control. Among all treatments, the highest value was observed in $Ca(NO_3)_2$ treatment, which suggested that $Ca(NO_3)_2$ had the best comprehensive application effect in above-standard Cd-contaminated soils. Thus $Ca(NO_3)_2$ could be used as optimum nitrogen source in above-standard Cd-contaminated soils in vegetable fields.

Keywords Nitrogen source; Vegetable field; Above-standard Cd-contaminated soil; Leafy vegetable; Availability of soil Cd

近年来，由于工业发展、矿产开采、大气沉降和不合理的农业活动等，导致珠江三角洲产地重金属含量呈上升趋势，其中菜地土壤镉(Cd)含量超标的现象较为突出[1–2]。蔬菜特别是叶菜类蔬菜对Cd的吸收能力和富集量最大，其镉含量超标问题最为严重[1,3]。Cd 是重金属中毒性最强的元素之一，长期食用Cd含量较高的食物，会对人体健康产生潜在危害，必须采取措施降低叶菜可食部分Cd含量以降低Cd的食物链风险。

施肥是农业生产中最重要的增产措施之一，也是农田生态系统中物质输入的重要途径。无机氮肥是化学晶体，比较洁净，一般不会有重金属污染土壤的问题[4]；但氮肥自身酸、碱性和转化过程中产生的酸、碱会对土壤根际 pH 产生较大影响，而土壤 pH 对土壤 Cd 溶解性影响最大[5]；加之氮肥组分对 Cd 的络合作用和阳离子对土壤胶体上 Cd 的置换作用，导致氮肥施入土壤后，会影响 Cd 在土壤中的生物活性，进而影响植物对 Cd 的吸收[6]。由于供试土壤、作物等的差异性，同种氮肥对污染土壤中同一重金属的生物有效性以及植物吸收重金属的影响也存在很大差异。Maier 等[7]发现在碱性轻质土壤中，施用 $Ca(NO_3)_2$ 的作物 Cd 含量较施用 $(NH_4)_2SO_4$ 的高，原因是 Ca^{2+} 与土壤吸附的 Cd^{2+} 之间存在交换作用；Alpha 等[8]研究则认为，施用 $(NH_4)_2SO_4$ 时植物吸 Cd 量较施用 $Ca(NO_3)_2$ 时大，主要是植物吸收 NH_4^+-N 引起 H^+ 的分泌或 NH_4^+-N 的硝化作用造成根际土壤 pH 降低所致。目前，关于氮肥影响植物吸收重金属的研究主要集中在两个方面：通过合理施氮降低植物对重金属的吸收[9–12]，或增加植物对重金属的吸收以提高植物修复的效率[12–15]。上述研究在一定程度上阐明了不同氮肥对重金属的作用机制，但研究结果多是在实验室条件下获得的，在受诸多外界因素影响的田间条件下施氮是否具有同样的作用效果还不得而知。因此，本文在 Cd 超标菜地开展田间小区试验，探讨不同形态氮肥对 Cd 累积特性不同的 2 种叶菜产量、品质及土壤质量的影响，进一步明确氮肥在降低叶菜 Cd 含量的实际应用价值，为通过合理施用氮肥实现 Cd 超标菜地上叶菜类蔬菜的安全生产提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

田间试验在地处珠江三角洲核心区内的广州市郊进行。叶菜是该地区种植的主要作物。气象条件属于南亚热带季风气候区，具有温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短等特征。全年水热同期，雨量充沛，年均降雨量为1 982.7 mm，年平均气温为 22 ℃。

该试验田常年种植叶菜，土壤理化性质为：pH 6.8，有机质 36.9 g·kg^{-1}，全氮 2.39 g·kg^{-1}，碱解氮 230 mg·kg^{-1}，有效磷 270 mg·kg^{-1}，速效钾 310 mg·kg^{-1}，总Cd 0.628 mg·kg^{-1}，DTPA-Cd 0.224 mg·kg^{-1}。该菜地土壤呈中性，土壤全氮、有效氮、有效磷、速效钾含量均属于极丰富水平。根据土壤环境质量标准(GB15618—1995)[16]，该菜地土壤Cd含量超过二级标准，属Cd超标菜地。

1.2 试验材料

1.2.1 叶菜品种

根据前期研究结果[17]，选择2种Cd累积特性不同的叶菜，其中Cd低吸收叶菜为矮脚葵扇黑叶白菜(*Brassica chinensis* L.)，Cd高吸收叶菜为白梗尖叶苋

菜(*Amaranthus mangostanus* L.)，种子均购自当地种子市场。

1.2.2 肥料品种

尿素(N 46%)、碳酸氢铵(N 17%)、硫酸钾(K_2O 50%)购自当地农资市场，硝酸钙(N 11.8%)、硝酸铵(N 32%)、磷酸二氢钙(P_2O_5 55%)为工业级，购自广州某化工城。

1.3 试验方案

1.3.1 试验设计与布置

两种叶菜均设4种氮肥处理，尿素、硝酸钙、硝酸铵、碳酸氢铵，氮肥用量均为150 $kg(N)\cdot hm^{-2}$，以不施氮肥作为对照，记为N_0，所有处理均施入相同用量的磷肥(磷酸二氢钙)和钾肥(硫酸钾)，P_2O_5和K_2O用量分别为60 $kg\cdot hm^{-2}$和112.5 $kg\cdot hm^{-2}$。

1.3.2 田间管理

葵扇黑叶白菜和白梗尖叶苋菜均采用直播方式，不施基肥。按照当地叶菜施肥习惯，氮、磷、钾肥均作为追肥，整个生育期分别按照设计用量的30%、35%和35%的比例分3次追施。每个处理重复4次，两种叶菜均设每小区20.6 m^2，田间随机排列，田间管理措施一致。

1.3.3 样品采集及测定

播种前采集0~20 cm土层样品，测定土壤基本理化性质。

1)植物样品：至叶菜收获期每个小区全部收获并测定商品产量，从中随机选取2 kg，并随机拔取30棵白梗尖叶苋菜和葵扇黑叶白菜的根系，带回实验室，分别用自来水和去离子水冲净，并用0.5 $mmol\cdot L^{-1}$ $CaCl_2$浸泡30 min，最后用去离子水冲洗，用吸水纸吸干表面水分，打浆，用于测定Cd含量。

2)土壤样品：白梗尖叶苋菜和葵扇黑叶白菜收获后，用土钻在每小区随机采集10个点的0~20 cm土样，混匀后作为一个土壤样品，于室温风干后分别过20目筛，备用。

1.4 测定项目与方法

植物样品的Cd含量采用HNO_3-$HClO_4$消解、石墨炉原子吸收分光光度法进行测定；维生素C用2,6-二氯靛酚滴定法、可溶性糖用蒽酮比色法、硝酸盐用紫外分光光度法、亚硝酸盐采用盐酸萘乙二胺法测定。土壤pH采用电位法(水：土=2.5：1)测定，有效态镉采用DTPA浸提火焰原子吸收分光光度法测定。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel软件整理数据，利用SAS 8.1软件进行数据的方差分析和统计分析。

2 结果与分析

2.1 外加不同氮源对叶菜产量的影响

4种氮肥对两种叶菜生长和产量有显著影响(表1)。未施氮的处理，种植前尽管菜地土壤碱解氮含量高达230 $mg\cdot kg^{-1}$，属于丰富水平，但白梗尖叶苋菜和葵扇黑叶白菜均表现出明显的缺氮症状，颜色淡绿，地上部生长受到抑制，其产量也低于各施氮处理。对于白梗尖叶苋菜，以尿素处理的产量最高，较对照处理增加47.5%，其次为硝酸钙，增幅为30.9%，硝酸铵和碳酸氢铵的增产效果较弱，与未施氮处理

表1 外加不同氮源对2种叶菜产量和Cd吸收总量的影响

Table 1 Effects of application of different nitrogen resources on yield and total Cd uptake of two kinds of leafy vegetables

氮源 Nitrogen resource	产量 Yield ($t\cdot hm^{-2}$)		Cd总吸收量 Total Cd uptake ($g\cdot hm^{-2}$)	
	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*
不施氮 No nitrogen addition (CK)	50.4±5.2c	23.9±2.00c	3.39±0.50b	0.49±0.04c
尿素 Urea	74.3±8.8a	35.8±3.03ab	4.03±0.54a	0.70±0.07ab
硝酸钙 Calcium nitrate	65.9±6.0ab	35.3±3.86ab	2.58±0.07c	0.67±0.08ab
硝酸铵 Ammonium nitrate	60.0±6.5bc	31.7±3.31b	2.90±0.12bc	0.62±0.04b
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	58.4±7.3bc	38.2±4.10a	3.11±0.28bc	0.75±0.13a
变异来源 Source of variation	*F*值 *F* value			
叶菜种类 Leafy vegetable kind	212.60***		975.14***	
氮源类型 Nitrogen resource	9.06***		9.30***	
叶菜种类×氮源类型 Leafy vegetable kind × nitrogen resource	2.29ns		9.29***	

表中数据为4次重复的平均值±标准差；同列数据后不同小写字母表示经LSD法检验差异显著($P<0.05$)。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$; ns: 不显著。下同。Data in the table are means ± SD (standard deviation) of four replicates. Values followed by different letters within the same column are significantly different according to LSD test at 0.05 level. *: $P<0.05$; ** : $P<0.01$; ***: $P<0.001$; ns: difference is not significant. The same below.

之间差异不显著；对于葵扇黑叶白菜，4种氮肥均显著提高了其产量，以碳酸氢铵效果最好，增幅为59.7%，尿素和硝酸钙次之，增幅分别为49.6%和47.7%，硝酸铵增产32.7%。双因素方差分析结果表明，不同叶菜(F=212.6)及不同氮源(F=9.06)对叶菜地上部和根系Cd含量均有显著影响，但两者之间的交互作用(F=2.29)不显著。

叶菜品种及氮肥种类对叶菜地上部Cd吸收总量均有显著影响，且两者的交互作用显著(表1)。与对照相比，硝酸钙、硝酸铵和碳酸氢铵均降低了白梗尖叶苋菜地上部Cd吸收总量，以硝酸钙处理降幅最大，达24.0%，而尿素处理则显著增加了白梗尖叶苋菜地上部Cd吸收总量，增幅达18.8%；4种氮肥均显著增加了葵扇黑叶白菜地上部Cd吸收总量，增幅达25.01%~51.2%。

2.2　外加不同氮源的叶菜地上部和根系 Cd 含量

双因素方差分析结果表明，叶菜品种及不同氮源对叶菜地上部和根系Cd含量均有显著影响，但两者之间的交互作用不显著。

所有处理中，2种叶菜地上部Cd含量均低于我国食品Cd限量标准[0.2 mg·kg^{-1}(FW)]。但施入不同氮源后，两种叶菜地上部Cd含量较不施氮处理均显著降低(表2)。与不施氮的对照相比，4种氮源均降低了白梗尖叶苋菜地上部Cd含量，降Cd效果以硝酸钙最好，降幅为41.6%，其次是硝酸铵，降低了27.8%，碳酸氢铵和尿素降Cd效果较弱，分别比对照处理降低20.5%和19.5%。4种氮源显著降低了葵扇黑叶白菜地上部Cd含量，降低幅度为 29.9%~32.2%，但各氮源处理之间无显著差异。在同种氮源处理下，白梗尖叶苋菜地上部Cd含量显著高于葵扇黑叶白菜，这与叶菜的Cd累积特性有关，白梗尖叶苋菜属于苋菜属，具有Cd高吸收特性，葵扇黑叶白菜属于芸苔属，具有Cd低累积特性[18]。

与对照相比，4种氮源对两种叶菜根系Cd含量也有不同程度降低作用。对于白梗尖叶苋菜，除硝酸铵处理外，其余3种氮源均显著降低了根系Cd含量，以尿素和硝酸钙降Cd效果最好，降低幅度均为24.1%。对于葵扇黑叶白菜，以尿素和硝酸钙降低根系Cd含量的效果最好，降低幅度分别为20.3%和25.9%，硝酸铵和碳酸氢铵降Cd效果不显著。

表 2　外加不同氮源对 2 种叶菜地上部和根系 Cd 含量的影响

Table 2　Effects of application of different nitrogen resources on shoot and root Cd contents of two kinds of leafy vegetables

mg·kg^{-1}(FW)

氮源 Nitrogen resource	地上部 Shoot		根系 Root	
	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*
不施氮 No nitrogen addition (CK)	0.067±0.006a	0.028±0.007a	0.087±0.009a	0.054±0.006a
尿素 Urea	0.054±0.002b	0.020±0.001b	0.066±0.010c	0.043±0.003b
硝酸钙 Calcium nitrate	0.039±0.003d	0.019±0.001b	0.066±0.006c	0.040±0.005b
硝酸铵 Ammonium nitrate	0.048±0.003c	0.020±0.001b	0.077±0.009ab	0.051±0.007a
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	0.053±0.002bc	0.019±0.002b	0.072±0.005bc	0.047±0.006ab
变异来源 Source of variation	*F* 值 *F* value			
叶菜种类 Leafy vegetable kind	866.60***		194.40***	
氮源类型 Nitrogen resource	31.68***		11.22***	
叶菜种类×氮源类型 Leafy vegetable kind × nitrogen resource	9.32***		0.76ns	

2.3　外加不同氮源的叶菜地上部 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量

双因素方差分析结果表明，不同叶菜、不同氮源及两者之间的交互作用对叶菜地上部NO_3^--N和NO_2^--N含量均有显著影响。

4 种氮肥均促进了两种叶菜地上部 NO_3^--N 的积累(表 3)。4 种氮肥处理的白梗尖叶苋菜地上部 NO_3^--N 含量比未施肥处理增加 3.03~3.96 倍，以尿素处理的增幅最大，碳酸氢铵处理的增幅最小。4 种氮肥处理的葵扇黑叶白菜地上部 NO_3^--N 含量比未施肥处理增加 6.60~7.03 倍，但不同氮肥处理间无显著差异。同种氮肥处理中，葵扇黑叶白菜地上部 NO_3^--N 含量远高于白梗尖叶苋菜，可能与叶菜品种不同有关。

4 种氮肥对 2 种叶菜地上部 NO_2^--N 含量影响存在显著差异。与对照相比，硝酸钙对白梗尖叶苋菜地上部 NO_2^--N 含量增加效果不显著，其余 3 种氮肥均显著增加了白梗尖叶苋菜地上部 NO_2^--N 含量，

表 3 外加不同氮源对 2 种叶菜地上部 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量的影响(以 $NaNO_2$ 计)

Table 3 Effects of application of different nitrogen resources on shoot nitrate and nitrite contents of two kinds of leafy vegetables

mg($NaNO_2$)·kg^{-1}(FW)

氮源 Nitrogen resource	NO_3^--N		NO_2^--N	
	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*
不施氮 No nitrogen addition (CK)	32±4c	107±18b	0.21±0.04c	0.27±0.03b
尿素 Urea	159±13a	859±41a	0.78±0.09a	0.29±0.02b
硝酸钙 Calcium nitrate	149±17ab	820±51a	0.26±0.04c	0.36±0.02a
硝酸铵 Ammonium nitrate	155±13a	828±76a	0.52±0.00b	0.26±0.03bc
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	129±13b	813±56a	0.57±0.00b	0.23±0.02c
变异来源 Source of variation	*F* 值 *F* value			
叶菜种类 Leafy vegetable kind	3 291.00***		300.20***	
氮源类型 Nitrogen resource	296.20***		84.82***	
叶菜种类×氮源类型 Leafy vegetable kind × nitrogen resource	155.10***		120.80***	

增幅为1.48~2.71倍。硝酸钙显著增加了葵扇黑叶白菜地上部NO_2^--N含量，尿素增加效果不显著，硝酸铵和碳酸氢铵处理呈降低趋势，其中碳酸氢铵处理降低效果显著。但两种叶菜地上部NO_2^--N含量均没有超过《食品中污染物限量》中规定的标准限值4 mg·kg^{-1}(以$NaNO_2$计)，各施肥处理中，NO_2^--N含量最高时为0.78 mg·kg^{-1}，因此不存在健康污染风险。

2.4 外加不同氮源对叶菜地上部维生素 C 和可溶性糖含量的影响

双因素方差分析结果表明，不同叶菜、不同氮源及两者之间的交互作用对叶菜地上部维生素C和可溶性糖含量均有显著影响。

施氮对两种叶菜地上部维生素 C 和可溶性糖含量有不同影响(表 4)。各施氮处理中，葵扇黑叶白菜地上部维生素 C 和可溶性糖含量均显著低于不施氮处理，地上部维生素 C 含量以尿素处理最低，比对照降低 37.7%；可溶性糖含量以碳酸氢铵处理最低，比对照降低 69.4%。白梗尖叶苋菜地上部维生素 C 和可溶性糖含量表现出不同的趋势，4 种氮肥中，尿素和硝酸钙增加了白梗尖叶苋菜地上部维生素 C 含量；碳酸氢铵增加了白梗尖叶苋菜地上部可溶性糖含量，但与对照无显著差异；其余 3 种氮肥均降低了白梗尖叶苋菜地上部可溶性糖含量，但与对照处理之间差异不显著。

表 4 外加不同氮源对 2 种叶菜地上部维生素 C 和可溶性糖含量的影响

Table 4 Effects of application of different nitrogen resources on shoot vitamin C and soluble sugar contents of two kinds of leafy vegetables soil

氮源 Nitrogen resource	维生素 C Vitamin C [mg·$100g^{-1}$]		可溶性糖 Soluble sugar (%)	
	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*
不施氮 No nitrogen addition (CK)	39.29±2.71bc	66.86±3.83a	1.03±0.09ab	1.34±0.13a
尿素 Urea	41.07±3.47ab	41.66±3.28c	0.94±0.08b	0.54±0.04b
硝酸钙 Calcium nitrate	45.33±2.72a	55.74±3.66b	0.90±0.07b	0.85±0.08c
硝酸铵 Ammonium nitrate	37.04±3.40bc	53.49±3.83b	0.99±0.10ab	0.54±0.09c
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	35.74±1.79c	58.70±2.17b	1.12±0.11a	0.41±0.05c
变异来源 Source of variation	*F* 值 *F* value			
叶菜种类 Leafy vegetable kind	82.79***		63.30***	
氮源类型 Nitrogen resource	5.66**		26.31***	
叶菜种类×氮源类型 Leafy vegetable kind × nitrogen resource	7.67***		29.37***	

2.5 外加不同氮源对土壤有效态 Cd 含量、pH 的影响

双因素方差分析结果表明，叶菜品种及氮肥品种对土壤DTPA-Cd含量影响显著，两者之间的交互作用对土壤DTPA-Cd含量无显著影响。氮肥品种对土壤pH影响显著，叶菜品种及两者之间的交互作用对土壤pH无显著影响。

氮肥对土壤 pH 有一定的影响。各处理中，施用硝酸铵的土壤 pH 最低，其中种植葵扇黑叶白菜的土壤较不施氮处理达显著水平；碳酸氢铵处理的最高，但与对照处理间无显著差异。

不同氮肥对土壤 DTPA-Cd 含量的影响不同(表 5)。对于种植白梗尖叶苋菜的土壤，4 种氮肥中，除硝酸钙处理外，其余氮肥均不同程度地增加了土壤 DTPA-Cd 含量，其中硝酸铵处理较不施氮处理达显著差异水平。对于种植葵扇黑叶白菜的土壤，与不施氮处理相比，硝酸铵和尿素增加了土壤 DTPA-Cd 含量，其中硝酸铵处理达显著差异水平；硝酸钙和碳酸氢铵降低了土壤 DTPA-Cd 含量，但较不施氮处理差异不显著。相同处理下，叶菜品种不同，土壤 DTPA-Cd 含量也有一定差异，所有处理中，种植白梗尖叶苋菜的土壤 DTPA-Cd 含量高于种植葵扇黑叶白菜的土壤，这可能与苋菜对土壤 Cd 具有一定的活化作用有关。

表 5　外加不同氮源对 2 种叶菜土壤 DTPA-Cd 含量及 pH 的影响

Table 5　Effects of application of different nitrogen resources on DTPA-Cd content and pH of two kinds leafy vegetables soil

氮源 Nitrogen resource	pH		DTPA-Cd (mg·kg^{-1})	
	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanus*	葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*
不施氮 No nitrogen addition (CK)	6.96±0.06ab	7.00±0.04a	0.184±0.009b	0.171±0.015bc
尿素 Urea	6.98±0.11ab	6.98±0.04a	0.189±0.019ab	0.181±0.010ab
硝酸钙 Calcium nitrate	6.95±0.14ab	7.01±0.11a	0.183±0.009b	0.162±0.007bc
硝酸铵 Ammonium nitrate	6.84±0.21b	6.75±0.14b	0.211±0.019a	0.196±0.010a
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	7.07±0.06a	7.01±0.15a	0.190±0.009ab	0.158±0.012c
变异来源 Source of variation	*F* 值 *F* value			
叶菜种类 Leafy vegetable kind	0.09^{ns}		15.11***	
氮源类型 Nitrogen resource	3.78*		6.13**	
叶菜种类×氮源类型 Leafy vegetable kind × nitrogen resource	0.42^{ns}		0.83^{ns}	

2.6　外加 4 种氮源的效果综合评价

为评价本试验中 4 种氮肥对 Cd 超标菜地土壤的综合应用效果，以上述叶菜产量、叶菜地上部和根 Cd 含量、叶菜地上部 Cd 吸收总量，叶菜地上部 NO_3^--N、NO_2^--N、维生素 C、可溶性糖含量，以及土壤 DTPA-Cd 含量、pH 等为评价指标进行综合评价。其中，叶菜产量、Cd 吸收总量、维生素 C 含量、可溶性糖含量和土壤 pH 为极大型指标(其取值越大越好)，其余为极小型指标(其取值越小越好)。首先将数据一致化，极小型数据用倒数法，化为极大型数据，再将数据无量纲化，最后运用主成分法进行综合评价，对 4 种氮肥的综合效果进行排序。各处理的综合加权平均值如表 6 所示。可见，对于白梗尖叶苋菜，4 种氮肥应用效果的排序结果为：硝酸钙>尿素>硝酸铵>碳酸氢铵>对照；对于葵扇黑叶白菜，4 种氮肥应用效果的排序结果为：硝酸钙>碳酸氢铵>尿素>硝酸铵>对照。

表 6　外加不同氮源对 Cd 超标土壤上 2 种叶菜的综合效应

Table 6　Comprehensive effects of application of different nitrogen resources on two kinds of leafy vegetables in Cd excessive soil

叶菜类型 Leafy vegetable kind	不施氮 No nitrogen addition	尿素 Urea	硝酸钙 Calcium nitrate	硝酸铵 Ammonium nitrate	碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate
白梗尖叶苋菜 *Amaranthus mangostanu*	1.348	3.723	5.045	2.661	1.923
葵扇黑叶白菜 *Brassica chinensis*	0.252	3.959	4.163	2.261	4.065

3　讨论与结论

已有的研究表明，在 Cd 污染土壤上施用氮肥，会显著影响植物生长、土壤性质及重金属形态和有效性，进而影响重金属在植物体内的迁移转化[8,18–19]。本田间试验条件下，施用氮肥后，叶菜地上部 Cd 含量显著降低，其中葵扇黑叶白菜地上部 Cd 含量与其生物量呈显著负相关关系(相关系数 r=–0.633 6, P=0.011 2)，白梗尖叶苋菜地上部 Cd 含量与其生物量虽呈负相关关系，但相关性不显著(相关系数 r=–0.447 4, P=0.094 5)，表明存在着一定程度的“稀释效应”，导致氮肥处理的两种蔬菜可食部位 Cd 含量较低。

氮肥还可通过改变土壤部分理化性质如土壤 DTPA-Cd 含量、pH 等影响作物对重金属的吸收。赵

晶[20]认为，铵态氮肥对根际土壤的酸化可导致土壤重金属有效性增加，硝酸铵降低土壤 pH，增加土壤可浸提 Cd 含量，且土壤可浸提 Cd 含量的变化与土壤 pH 变化呈现很好的负相关。本田间试验条件下，硝酸铵的酸化效应提高了土壤 Cd 的有效性。Portmann[21]也认为，150 mg·kg^{-1} 的硝酸铵促进了小麦植株的生长，增加了小麦植株对 Cd 的吸收，原因是硝酸铵降低了土壤溶液 pH，导致氢离子活性增加，引起带正电荷的氢离子和带正电荷的金属离子对土壤矿物和有机质颗粒吸收位点的竞争性增加，这种竞争导致土壤溶液中更多的自由态金属离子可供植物吸收。硝酸钙和尿素对土壤 pH 和 DTPA-Cd 含量的作用效果均不如前期盆栽试验结果明显[10]，但硝酸钙处理的叶菜地上部、根系 Cd 含量及地上部 Cd 吸收总量均最低，可能原因是施入硝酸钙后，土壤溶液中与镉竞争根吸收位点的钙增多，根系吸收转运的 Cd 减少[22]。Tu 等[23]则认为，尿素在 200 mg(N)·kg^{-1} 时使土壤 Pb 和 Cd 向相对活性较低的碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态转化。另有研究发现，高 Cd 处理下施氮可使杨树(*Populus* spp.)植株生长良好，推测可能与氮通过谷氨酸及谷胱甘肽途径在毒害或脱毒过程中起着重要作用有关[24]。

施用氮肥后，2 种叶菜 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量总体呈增加趋势，维生素 C 和可溶性糖含量也有不同程度地降低，在一定程度上影响了蔬菜的安全性以及营养价值。因此，基于氮肥对土壤及作物的不同影响，综合评价氮肥在 Cd 超标农田上的应用效果，对合理利用氮肥实现 Cd 超标农田的持续安全利用及农产品的安全生产至关重要。目前我国在进行污染土壤修复效果评价的主要评价标准是，使土壤环境中污染物的浓度降低到对人体健康和生态系统不构成威胁的水平[25]。然而，备受关注的化学固化/稳定化等方法只改变了土壤重金属形态，总量没有变化，使用土壤重金属总量的降低作为评判标准显然不合适，也不能真正反映土壤修复效果和水平[26]。本研究的技术是期望通过施肥调控 Cd 污染菜地，以降低农产品重金属含量，获得较高产量和较好的品质，改善土壤理化性质。因此，本研究试图从叶菜产量、Cd 含量、部分叶菜品质指标、土壤性质等多个角度综合评价氮肥应用效果。从评价结果来看，无论是对于白梗尖叶苋菜还是葵扇黑叶白菜，硝酸钙的综合加权平均值均最高，表明硝酸钙可以作为 Cd 污染菜地上应用的优选氮肥品种。

尽管氮肥的施用对 Cd 在叶菜体内的吸收积累能力有较大影响，但目前关于氮肥对 Cd 超标土壤中作物生长及 Cd 吸收影响的研究还不够深入，特别是氮肥如何缓解 Cd 胁迫对植物生长抑制的研究还不够全面。因此，针对 Cd 污染农田，还需深入研究田间条件下 N 素参与植物对 Cd 的解毒机理，以及 N、Cd 交互作用下土壤 Cd 赋存形态的转化等，以阐明氮肥对 Cd 的作用机制，为氮肥的合理使用提供理论依据。

参考文献 References

[1] 崔晓峰，李淑仪，丁效东，等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报，2012，21(1): 130–135
Cui X F, Li S Y, Ding X D, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 130–135

[2] 宋启道，方佳，王富华，等. 广东省主要蔬菜产地土壤中重金属含量调查与评价[J]. 环境污染与防治，2008，30(5): 91–93
Song Q D, Fang J, Wang F H, et al. Analysis and evaluation of soil heavy metal contents in main vegetable producing soils of Guangdong Province[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(5): 91–93

[3] 秦文淑，邹晓锦，仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 农业环境科学学报，2008，27(4): 1638–1642
Qin W S, Zou X J, Qiu R L. Health risk of heavy metals to the general public in Guangzhou, China via consumption of vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1638–1642

[4] 曹志洪. 施肥与土壤健康质量——论施肥对环境的影响(3)[J]. 土壤, 2003, 35(6): 450–455
Cao Z H. Effect of fertilization on soil health quality — Effect of fertilization on environment quality (3)[J]. Soils, 2003, 35(6): 450–455

[5] 赵晶，冯文强，秦鱼生，等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953–961
Zhao J, Feng W Q, Qin Y S, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 953–961

[6] Wangstrand H, Eriksson J, Öborn I. Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(3): 209–214

[7] Maier N A, McLaughlin M J, Heap M, et al. Effect of nitrogen source and calcitic lime on soil pH and potato yield, leaf chemical composition, and tuber cadmium concentrations[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(3): 523–544

[8] Alpha J M, Chen J H, Zhang G P. Effect of nitrogen fertilizer forms on growth, photosynthesis, and yield of rice under cadmium stress[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(2):

306–317
[9] 张帆, 万雪琴, 王长亮, 等. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(3): 317–321
Zhang F, Wan X Q, Wang C L, et al. Effects of nitrogen supplement on photosynthetic characteristic and growth rate of poplar plants under cadmium stress[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2011, 29(3): 317–321
[10] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 等. 氮肥对镉在土壤–芥菜系统中迁移转化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 649–653
Wang Y H, Ai S Y, Li M J, et al. Effect of nitrogen fertilization on cadmium translocation in soil-mustard system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 649–653
[11] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮肥对小麦生长和吸收镉的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(1): 58–62
Zhao J, Feng W Q, Qin Y S, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on wheat growth and cadmium uptake[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, 16(1): 58–62
[12] 张学洪, 蔡湘文, 李恺, 等. 氮肥形态对李氏禾富集铬的影响及其生化分析[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(3): 399–403
Zhang X H, Cai X W, Li K, et al. Effect of nitrogen forms on Cr uptake by the Leersia hexandra Swartz and biochemical analysis[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2011, 31(3): 399–403
[13] 付婷婷, 伍钧, 漆辉, 等. 氮肥形态对日本毛连菜生长及 Pb 累积特性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 257–260
Fu T T, Wu J, Qi H, et al. Effects of nitrogen fertilizer forms on growth and Pb accumulation characteristics of *Picris japonica* Thunb[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 257–260
[14] 汪洁, 沈丽波, 李柱, 等. 氮肥形态对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2118–2124
Wang J, Shen L B, Li Z, et al. Effects of nitrogen forms on growth and Zn/Cd uptake of *Sedum Plumbizincicola*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2118–2124
[15] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 氮肥形态和螯合剂对印度芥菜和高积累镉油菜吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 625–629
Wang J Q, Ru S H, Su D C. Effects of nitrogenous fertilizers and chelators on absorption of cadmium by Indian Mustard and Oilseed Rape[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 625–629
[16] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995
SEPA, SBQTS. GB 15618—1995 Environmental Quality Standard for Soils[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995
[17] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 信息叠加法大田初步筛选镉铅低富集叶菜[J]. 土壤, 2011, 43(2): 226–231
Tang M D, Ai S Y, Li M J, et al. Preliminary screening for leaf vegetables with lower Cd or Pb contents by using informational superposition in fields[J]. Soils, 2011, 43(2): 226–231
[18] 刘安辉, 赵鲁, 李旭军, 等. 氮肥对镉污染土壤上小油菜生长及镉吸收特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 77–81
Liu A H, Zhao L, Li X J, et al. Effect of nitrogen fertilizer on rape growth and uptake characteristics of cadmium[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(2): 77–81
[19] 李波, 青长乐, 周正宾, 等. 肥料中氮磷和有机质对土壤重金属行为的影响及在土壤治污中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(6): 375–377
Li B, Qing C L, Zhou Z B, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and organic matter on heavy metal behavior in soils and its application of controlling pollution[J]. Agro-environmental Protection, 2000, 19(6): 375–377
[20] 赵晶. 不同氮磷钾肥对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009
Zhao J. Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on availability of soil cadmium and cadmium uptake by wheat[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009
[21] Portmann D. Cadmium and zinc uptake in wheat as affected by nitrogen fertilization and agricultural management[D]. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology Zuich, 2012
[22] 宋正国, 徐明岗, 李菊梅, 等. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1705–1710
Song Z G, Xu M G, Li J M, et al. Effects of calcium on cadmium bioavailability in lateritic red soil and related mechanisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1705–1710
[23] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2): 133–138
[24] Zhang F, Wan X Q, Zhong Y. Nitrogen as an important detoxification factor to cadmium stress in poplar plants[J]. Journal of Plant Interactions, 2014, 9(1): 249–258
[25] 周启星. 污染土壤修复标准建立的方法体系研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 316–320
Zhou Q X. Methodology of enacting standards for remediation of contaminated soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 316–320
[26] 徐应明. 污染土壤修复、诊断与标准体系建立的探讨[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 413–418
Xu Y M. Issues concerned with remediation technology, diagnosis methods and standards for contaminated soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 413–418